小麦-豆粕型饲粮中亚油酸水平对雏鹅生长性能、脂类代谢、抗氧化功能及免疫机能的影响[1]

葛文华　王宝维*　张洋洋　龙建华　史雪萍　张名爱　岳　斌

（青岛农业大学优质水禽研究所，国家水禽产业技术体系营养与饲料功能研究室，青岛 266109）

摘　要：本试验通过研究小麦-豆粕型饲粮中亚油酸水平对雏鹅生长性能、脂类代谢、抗氧化功能及免疫机能的影响，旨在进一步探索小麦-豆粕型饲粮中亚油酸适宜水平。试验选用1日龄五龙鹅360只，随机分为6组，每组6个重复，每个重复10只鹅（公母各1/2）。Ⅰ组（对照组）饲喂亚油酸水平为0.52%的基础饲粮，试验组（Ⅱ～Ⅵ组）饲喂亚油酸水平分别为0.72%、0.92%、1.12%、1.32%和1.52%试验饲粮。试验期4周。结果表明：1）各试验组体重（BW）、平均日增重（ADG）、料重比（F/G）均优于对照组，饲粮中亚油酸水平为1.12%时BW最大，F/G最低。2）Ⅳ、Ⅴ组血清总胆固醇（TCH）含量极显著低于对照组($P<0.01$)，Ⅳ、Ⅴ组血清甘油三酯（TG）含量显著低于对照组($P<0.05$)，Ⅳ、Ⅴ组血清高密度脂蛋白胆固醇（HDL-C）含量极显著高于对照组($P<0.01$)，Ⅳ组血清低密度脂蛋白胆固醇（LDL-C）含量显著低于对照组($P<0.05$)。3）Ⅵ组血清和肝脏中的总抗氧化能力（T-AOC）及总超氧化物歧化酶（T-SOD）、谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）活性极显著高于对照组($P<0.01$)。4）Ⅳ组法氏囊指数极显著高于对照组($P<0.01$)，Ⅲ组血清免疫球蛋白G(IgG)含量显著高于对照组($P<0.05$)；免疫14天后，Ⅲ组禽流感抗体滴度极显著高于对照组($P<0.01$)。由此可见，小麦-豆粕型饲粮中适宜亚油酸水平对雏鹅生长性能、脂类代谢、抗氧功能及免疫机能有显著影响；建议小麦-豆粕型雏鹅饲粮中亚油酸适宜水平为1.12%。

关键词：亚油酸；雏鹅；生长性能；脂类代谢；抗氧化功能；免疫机能

中图分类号：S835

亚油酸是必需脂肪酸，是n-6系列多不饱和脂肪酸（PUFA）的初始成员。亚油酸在免疫调节、脂类代谢、心血管疾病等方面起着非常重要的作用[1]。然而，目前我国缺乏肉鹅营养需要量标准，亚油酸需要量参数还处于空白，因此，鹅亚油酸营养需要量研究具有重要意义。Balnave[2]研究表明，雏鸡亚油酸缺乏时，对疾病的抵抗力会大大降低，饮水会量增加，生长会变得很慢，肝脏伴随脂肪含量的提高导致体积会增大，花生四烯酸和亚油酸含量因大部分组织结构中二十碳三烯酸含量的提升而下降。Cunnane[3]研究报道，猪亚油酸缺乏会导致生长发育缓慢，发生皮肤性炎症，毛细血管会变脆，水分损失增多，免疫力下降，导致患有多种心血管疾病，大部分妊娠母猪和生长猪会出现上述症状。Mc Dowell[4]报道，基础代谢紊乱是由于亚油酸供应不足，导致处于膜中的亚油酸被替换、线粒体的结构被改变和氧化

收稿日期：2018-03-07

基金项目：国家水禽产业技术体系专项基金(CARS-43-11)；山东省良种工程（12-1-3-17-nsh）

作者简介：葛文华(1961-)，女，山东莱州人，高级工程师，研究方向为家禽营养与保健。E-mail: wangbw1959@qq.com

*通信作者：王宝维，教授，研究生导师，E-mail: wangbw@qau.edu.cn

磷酸化被阻断等一些原因。Pentieva 等[5]研究发现，PUFA 能降低血脂，减少高血脂对机体新陈代谢造成的负担的，而且 PUFA 还能有效降低血清胆固醇及体内脂肪沉积。杨小军等[6]研究发现，脾脏中的过氧化氢酶（CAT）和超氧化物歧化酶（SOD）可以被饲粮鱼油和玉米油改善，而且饲粮鱼油和玉米油可以使21日龄肉仔鸡脾脏中SOD活性得到提高。NRC（1994）[7]建议鹅在 1~4 周龄对亚油酸的需求量为 1%。目前，世界上其他国家对于鹅的亚油酸需要量研究较少。正常情况下采用玉米、豆粕为主要原料配制的肉鹅饲粮，亚油酸一般不缺乏；然而，如果采用小麦为主要原料配置全价饲粮，由于亚油酸缺乏，会使生长性能效果低于以玉米为主配制的饲粮。因此，本研究以五龙鹅雏鹅为试验对象，通过研究不同亚油酸水平对其生长性能、脂类代谢、抗氧化功能及免疫性能的影响，旨在确定小麦-豆粕型饲粮中亚油酸适宜水平，为我国鹅营养标准制定和科学利用饲料资源提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验动物与试验设计

选取 360 只健康的 1 日龄五龙鹅，用随机分配的方法将其分为 6 组，每组 6 个重复，每个重复 10 只鹅（公母各 5 只）。Ⅰ组为对照组，饲喂亚油酸水平为 0.52%的基础饲粮；Ⅱ～Ⅵ组为试验组，利用玉米油、棕榈油和牛油调节饲粮中脂肪酸组成比例基本一致，并使各组饲粮亚油酸水平分别达到 0.72%、0.92%、1.12%、1.32%和 1.52%。试验期为 4 周。

1.2　试验饲粮

基础饲粮营养水平参照 NRC（1994）家禽营养需要量设计，试验饲粮组成及营养水平见表 1。采用气相色谱法测定基础饲粮中亚油酸水平为 0.52%。

表 1　试验饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 1　Composition and nutrient levels of experimental diets　（air-dry basis）　%

项目 Items	组别 Groups					
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ
原料 Ingredients						
小麦 Wheat	59.10	60.66	60.66	60.66	60.66	60.66
大豆粕 Soybean meal	23.50	23.61	23.61	23.61	23.61	23.61
玉米秸秆 Corn straw	8.45	6.83	6.83	6.83	6.83	6.83
牛油 Tallow	5.55	3.00	2.59	2.18	1.72	1.03
玉米油 Corn oil			0.40	0.80	1.19	1.54
棕榈油 Sodium palmale		2.50	2.51	2.52	2.59	2.93
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
石粉 Limestone	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

食盐 NaCl	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
L-赖氨酸盐酸盐 *L*-Lys·HCL	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
DL-蛋氨酸 *DL*-Met	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
微量元素 Trace elements1)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
多维素 Multivitamin1)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels2)						
代谢能 ME/（MJ/kg）	11.80	11.80	11.80	11.80	11.80	11.80
粗蛋白质 CP	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00
钙 Ca	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
有效磷 AP	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
赖氨酸 Lys	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
蛋氨酸 Met	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
亚油酸 Linoleic acid	0.52	0.72	0.92	1.12	1.32	1.52

1) 多维素和微量元素为每千克饲粮提供 The multivitamin and trace elements provided the following per kg of diets：VA 1 500 mg，VD_3 200 IU，VE 12.5 mg，VK_3 1.5 mg，VB_1 2.2 mg，VB_2 5.0 mg，烟酸 nicotinic acid 65 mg，泛酸 pantothenate 15 mg，生物素 biotin 0.2 mg，VB_6 2 mg，叶酸 folic acid 0.5 mg，胆碱 choline 1 000 mg，Fe 90 mg，Cu 6 mg，Mn 85 mg，Zn 85 mg，I 0.42 mg，Se 0.3 mg，Co 2.5 mg。

2)亚油酸为实测值，其他营养水平为计算值。Linoleic acid was a measured value, while other nutrient levels were calculated values.

1.3 饲养管理

试验雏鹅采用舍饲，地面分栏饲养；鹅舍定期全面消毒，保证鹅健康生长发育。自由采食和饮水，少添喂勤，每日观察鹅的生长发育状况。试验抽样、称重与计数准确。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 生长性能指标

每周末 08：00 以重复为单位进行空腹称重，称重前 6 h 停料不停水。每周末以重复为单位，按“清箱底法”统计耗料量。统计计算体重（BW）、平均日增重（ADG）、平均日采食量（ADFI）、料重比（F/G）。每天记录各组死亡及淘汰情况，计算死淘率。

1.4.2 脂类代谢指标

4 周龄末，鹅翅脉处采血 10 mL，3 000 r/min 离心制得血清样品。采用 UV-1100 型紫外可见光分光光度计测定血清甘油三酯（TG）、总胆固醇（TCH）、高密度脂蛋白胆固醇（HDL-C）、低密度脂蛋白胆固醇（LDL-C）含量。

1.4.3 抗氧化指标

4 周龄末，各组每重复随机选择 2 只鹅，翅静脉采血，3 000 r/min 离心制得血清样品，分装，-40 ℃冷冻保存。采血后进行屠宰，切除部分肝脏，用于制备 10%的肝组织匀浆。X 血清和肝脏总抗氧化能力（T-AOC）、总超氧化物歧化酶（T-SOD）活性、丙二醛（MDA）含量、谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）活性均采用 UV-1100 型紫外可见光分光光度计进行测定。

1.4.4 免疫指标

1.4.4.1 免疫器官指数的测定

采血后，颈静脉放血致死，剖开腹腔，切取胸腺、脾脏、法氏囊，进行免疫器官指数的测定。

免疫器官指数（g/kg）=免疫器官鲜重（g）/活体重（kg）。

1.4.4.2 免疫球蛋白含量的测定

采用免疫比浊法测定血清免疫球蛋白 A（IgA）、免疫球蛋白 M（IgM）、免疫球蛋白 G（IgG）含量，试剂盒购自南京建成生物工程研究所。

1.4.4.3 禽流感抗体滴度的测定

36 日龄时，在试验动物接种禽流感疫苗后 7、14、21、28 d 翅静脉采血并离心，取血清，用于血清抗体滴度测定。采用血凝和血凝抑制试验法（HA-HI）测定鹅血清禽流感抗体滴度。

1.5 统计分析

在 SPSS 软件中选取单因素方差分析(one-way ANOVA)中的 LSD 法进行多重比较比，P<0.05 和 P<0.01 分别表示差异显著和极显著。

2 结果与分析

2.1 饲粮中亚油酸水平对雏鹅生长性能的影响

由表 2 可知，饲粮中添加亚油酸极显著影响雏鹅 F/G、ADG（P<0.01），显著影响雏鹅 BW（P<0.05），并且均呈二次曲线关系（P<0.05）。其中，Ⅳ组 BW 极显著高于Ⅰ组（P<0.01），Ⅳ组 BW 显著高于Ⅱ、Ⅲ组（P<0.05）；Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ组 ADG 显著高于Ⅰ、Ⅱ、Ⅵ组（P<0.05）；Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ组 F/G 极显著低于Ⅰ、Ⅱ、Ⅵ组（P<0.05）。Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ组之间 ADG、F/G 差异不显著（P>0.05）。各组之间 ADFI 差异不显著（P>0.05）。

以上结果表明，试验组的 BW、ADG、F/G 均优于对照组，饲粮中亚油酸水平为 1.12%时 BW 最大，F/G 最低。因此，以Ⅰ～Ⅳ组 BW（Y）与小麦-豆粕型饲粮亚油酸水平（X）进行二次曲线拟合，建立回归方程如下：

$$Y=1.206+0.264X-0.110X^2 \quad (R^2=0.621,\ P_Q=0.000)。$$

由上述曲线回归方程得出：小麦-豆粕型饲粮亚油酸水平为 1.2%时 BW 最大。

表 2　饲粮中亚油酸水平对雏鹅生长性能的影响

Table 2　Effects of dietary linoleic acid level on growth performance of gosling

项目 Items	组别 Groups						SEM	*P* 值 *P*-value		
	I	II	III	IV	V	VI		亚油酸 Linoleic acid	线性 Linear	二次 Quadratic
体重 BW/kg	1.32[c]	1.33[bc]	1.35[bc]	1.38[a]	1.36[ab]	1.35[abc]	0.058	0.013	0.009	0.018
平均日增重 ADG/g	37.65[b]	39.32[b]	41.98[a]	43.46[a]	41.57[a]	38.18[b]	0.568	<0.001	0.091	<0.001
平均日采食量 ADFI/g	86.57	86.86	86.31	87.93	86.47	87.03	0.277	0.655	0.651	0.729
料重比 F/G	2.30[a]	2.21[a]	2.05[b]	2.02[b]	2.08[b]	2.28[a]	0.030	0.001	0.139	<0.001

同行数据肩标相同小写字母或无字母表示差异不显著(P＞0.05)，相邻小写字母表示差异显著(P＜0.05)，相间小写字母表示差异极显著(P＜0.01)。下表同。

In the same row, values with the same small or no letter superscripts mean no significant difference (P＞0.05), while with adjacent small letter superscripts mean significant difference (P＜0.05), and with alternate small letter superscripts mean significant difference (P＜0.01). The same as below.

2.2　饲粮中亚油酸水平对雏鹅脂类代谢的影响

由表 3 可知，饲粮中添加亚油酸极显著影响雏鹅血清 TCH、LDL-C 含量(P<0.01)，且均呈二次曲线关系(P<0.05)；其中，Ⅳ、Ⅴ组血清 TCH 含量极显著低于Ⅰ组(P<0.01)，Ⅳ组血清 LDL-C 含量显著低于Ⅰ组(P<0.05)。饲粮中添加亚油酸显著影响雏鹅血清 TG 含量(P<0.05)，且呈一次线性关系(P<0.05)，即随着饲粮中亚油酸水平的升高，血清 TG 含量有下降的趋势；其中，Ⅳ、Ⅴ组血清 TG 含量显著低于Ⅰ组(P<0.05)。饲粮中添加亚油酸显著影响雏鹅血清 HDL-C 含量(P<0.05)，且呈二次曲线关系(P<0.05)；其中，Ⅳ、Ⅴ组血清 HDL-C 含量极显著高于Ⅰ组(P<0.01)。

以上结果表明，饲粮中亚油酸水平为 1.12%时血清 TCH、TG 含量最低，血清 HDL-C 含量极显著升高，血清 LDL-C 含量显著降低，饲粮中亚油酸水平超过 1.32%时对脂类代谢指标没有显著影响。这说明小麦-豆粕型饲粮中适宜亚油酸水平对保障鹅机体脂类正常代谢有显著作用。

表 3　饲粮中亚油酸水平对雏鹅脂类代谢的影响

Table 3　Effects of dietary linoleic acid level on lipid metabolism of gosling　　mmol/L

项目 Items	组别 Groups						SEM	*P* 值 *P*-value		
	I	II	III	IV	V	VI		亚油酸 Linoleic acid	线性 Linear	二次 Quadratic
总胆固醇	3.37[a]	3.12[bc]	3.09[bc]	2.74[d]	3.01[c]	3.26[ab]	0.232	0.001	0.017	<0.001

TCH										
甘油三酯 TG	1.07^{a}	0.98^{ab}	0.97^{ab}	0.86^{b}	0.89^{b}	0.95^{ab}	0.022	0.048	0.012	0.057
高密度脂蛋白胆固醇 HDL-C	1.69^{c}	1.72^{bc}	1.83^{ab}	1.86^{a}	1.84^{a}	1.75^{abc}	0.019	0.029	0.038	0.007
低密度脂蛋白胆固醇 LDL-C	2.70^{ab}	2.63^{ab}	2.53^{bc}	2.46^{c}	2.58^{bc}	2.78^{a}	0.031	0.009	0.697	<0.001

2.3　饲粮中亚油酸水平对雏鹅血清抗氧化功能的影响

由表 4 可知，饲粮中添加亚油酸极显著影响雏鹅血清 T-AOC、GSH-Px 活性（$P<0.01$），且均呈二次曲线关系（$P<0.05$）；其中，Ⅳ组血清 T-AOC、GSH-Px 活性极显著高于Ⅰ组（$P<0.01$）。饲粮中添加亚油酸显著影响血清 T-SOD 活性（$P<0.05$），且呈一次线性关系（$P<0.05$），即随着饲粮中亚油酸水平的升高血清 T-SOD 活性有升高的趋势；其中，Ⅳ组血清 T-SOD 活性极显著高于Ⅰ组（$P<0.01$）。各组之间血清 MDA 含量差异不显著（$P>0.05$）。

表 4　饲粮中亚油酸水平对雏鹅血清抗氧化功能的影响

Table 4　Effects of dietary linoleic acid level on serum antioxidant capacity of gosling

项目 Items	组别 Groups						SEM	*P* 值 *P*-value		
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ		亚油酸 Linoleic acid	线性 Linear	二次 Quadratic
总抗氧化能力 T-AOC/(U/mL)	12.38^{c}	13.27^{bc}	13.86^{ab}	14.57^{a}	13.96^{ab}	12.82^{c}	0.216	0.001	0.060	<0.001
总超氧化物歧化酶 T-SOD/(U/mL)	119.15^{c}	120.15^{bc}	122.29^{abc}	124.93^{a}	123.58^{ab}	123.54^{c}	0.624	0.025	0.003	0.087
谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px/(U/mL)	1 114.99^{c}	1 138.08^{bc}	1 166.04^{ab}	1 183.26^{a}	1 170.31^{ab}	1 159.35^{ab}	6.58	0.008	0.003	0.005
丙二醛 MDA/(nmol/mL)	4.79	4.74	4.63	4.73	4.50	4.82	0.059	0.700	0.729	0.355

由表 5 可知，饲粮中添加亚油酸显著影响雏鹅肝脏 T-AOC 及 T-SOD、GSH-Px 活性（$P<0.05$），且均呈二次曲线关系（$P<0.05$）；其中，Ⅳ组肝脏 T-AOC 及 T-SOD、GSH-Px 活性极显著高于Ⅰ组（$P<0.01$）。各组之间肝脏 MDA 含量差异不显著（$P>0.05$）。

以上结果表明，当饲粮中亚油酸水平为 1.12%时，能极显著提高雏鹅血清和肝脏的 T-AOC、T-SOD 和 GSH-Px 活性。这说明小麦-豆粕型饲粮中适宜亚油酸水平对增强雏鹅机体抗氧化功能具有重要影响。

表 5　饲粮中亚油酸水平对雏鹅肝脏抗氧化功能的影响

Table 5　Effects of dietary linoleic acid level on liver antioxidant capacity of gosling

项目 Items	组别 Groups	SEM	*P* 值 *P*-value

	I	II	III	IV	V	VI		亚油酸 Linoleic acid	线性 Linear	二次 Quadratic
总抗氧化能力 T-AOC/(U/mg prot)	1.66[c]	1.71[c]	2.05[ab]	2.13[a]	2.08[ab]	1.75[bc]	0.059	0.025	0.088	0.004
总超氧化物歧化酶 T-SOD/(U/mg prot)	224.34[c]	231.68[bc]	238.65[ab]	247.08[a]	244.07[ab]	240.49[ab]	2.414	0.035	0.006	0.041
谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px/(U/mg prot)	154.46[c]	159.68[bc]	170.69[abc]	184.19[a]	175.22[ab]	163.86[bc]	3.093	0.030	0.043	0.009
丙二醛 MDA/(nmol/mg prot)	2.64	2.64	2.66	2.64	2.65	2.68	0.112	0.917	0.378	0.774

2.4 饲粮中亚油酸水平对雏鹅免疫机能的影响

2.4.1 饲粮中亚油酸水平对雏鹅免疫器官指数的影响

由表 6 可知，饲粮中添加亚油酸显著影响雏鹅法氏囊指数（P<0.05），且呈二次曲线关系（P<0.05）；其中，V 组法氏囊指数显著高于 I 组（P<0.05），Ⅳ组极显著高于 I 组（P<0.01）。各组之间脾脏指数和胸腺指数有随着饲粮中亚油酸水平提高先增加后降低趋势。

以上结果表明，饲粮中亚油酸水平为 1.12%时能提高雏鹅的免疫器官指数。

表 6 饲粮中亚油酸水平对雏鹅免疫器官指数的影响

Table 6 Effects of dietary linoleic acid level on immune organ indices of gosling

项目 Items	组别 Groups						SEM	P 值 P-value		
	I	II	III	IV	V	VI		亚油酸 Linoleic acid	线性 Linear	二次 Quadratic
胸腺指数 Thymus index	1.43	1.50	1.60	1.48	1.45	1.57	0.029	0.599	0.510	0.720
脾脏指数 Spleen index	0.79	1.12	1.16	1.00	0.96	0.89	0.059	0.501	0.936	0.107
法氏囊指数 Bursa of Fabricius index	1.16[c]	1.19[bc]	1.24[bc]	1.48[a]	1.35[ab]	1.29[bc]	0.033	0.023	0.017	0.045

2.4.2 饲粮中亚油酸水平对雏鹅血清免疫球蛋白含量的影响

由表 7 可知，饲粮中添加亚油酸极显著影响血清 IgG 含量（P<0.01），且呈二次曲线关系（P<0.05）；其中，Ⅳ组血清 IgG 含量显著高于 I 组（P<0.05），III组极显著高于 I 组（P<0.01）。各组之间血清 IgM、IgA 含量有随着饲粮中亚油酸水平提高先增加后降低趋势。

以上结果表明，饲粮中亚油酸水平为 1.12%时能提高雏鹅的血清免疫球蛋白含量。

表 7 饲粮中亚油酸水平对雏鹅血清免疫球蛋白含量的影响

Table 7　Effects of dietary linoleic acid level on serum immunoglobulin content of gosling　　g/L

项目 Items	组别 Groups						SEM	P 值 P-value		
	I	II	III	IV	V	VI		亚油酸 Linoleic acid	线性 Linear	二次 Quadratic
免疫球蛋白 G IgG	3.71^{c}	3.82^{bc}	4.08^{a}	4.00^{ab}	3.65^{c}	3.71^{c}	0.045	0.002	0.331	0.001
免疫球蛋白 M IgM	0.82	0.82	1.14	0.86	0.83	0.77	0.066	0.701	0.733	0.305
免疫球蛋白 A IgA	0.87	1.01	1.10	1.14	0.85	1.01	0.037	0.116	0.683	0.073

2.4.3　饲粮中亚油酸水平对雏鹅禽流感抗体滴度的影响

由表 8 可知，饲粮中添加亚油酸显著影响免疫后 14 d 后的禽流感抗体滴度（P<0.05），且呈二次曲线关系（P<0.05）；其中，Ⅳ、Ⅴ组禽流感抗体滴度显著高于Ⅰ组（P<0.05），III 组禽流感抗体滴度极显著高于Ⅰ组（P<0.01）。免疫后 7、21、28 d，各组之间禽流感抗体滴度有随着饲粮中亚油酸水平升高先增加后降低趋势。

以上结果表明，饲粮中亚油酸水平为 0.92%时能显著提高禽流感抗体滴度。

表 8　饲粮中亚油酸水平对雏鹅禽流感抗体滴度的影响

Table 8　Effects of dietary linoleic acid level on antibody titre of avian influenza of gosling

log2

项目 Items	组别 Groups						SEM	P 值 P-value		
	I	II	III	IV	V	VI		亚油酸 Linoleic acid	线性 Linear	二次 Quadratic
免疫后 7 d 7 days after immunization	6.01	6.08	6.20	6.29	6.28	6.22	0.038	0.204	0.030	0.169
免疫后 14 d 14 days after immunization	6.41^{c}	6.49^{bc}	6.84^{a}	6.63^{b}	6.63^{ab}	6.60^{bc}	0.039	0.011	0.046	0.008
免疫后 21 d 21 days after immunization	6.68	6.73	6.81	6.68	6.54	6.80	0.048	0.698	0.912	0.874
免疫后 28 d 28 days after immunization	6.05	5.98	6.12	6.24	5.92	5.93	0.051	0.476	0.525	0.243

3　讨　论

3.1 饲粮中亚油酸水平对雏鹅生长性能的影响

亚油酸是促细胞生长增殖的生长因子，为细胞膜的合成提供脂质，为细胞的生长提供水溶性的脂类，所以亚油酸对动物的生长有一定的促进作用[8-10]。王爽等[9]研究表明，在产蛋初期蛋鸭饲粮中亚油酸水平分别为0.55%、0.75%、0.95%、1.15%、1.35%、1.55%时，当饲粮中亚油酸水平为0.95%时产蛋率、蛋重及日产蛋重均达到最大值，且料蛋比最低。张哲等[11]研究在饲粮中添加不同水平PUFA对肉鸡生长性能影响时发现，与对照组相比，各试验组饲料转化率提高，F/G降低，证实了肉鸡饲粮中添加PUFA可改善肉鸡养分利用率，进而提高生长性能，降低F/G。本试验研究表明，饲粮中亚油酸水平为1.12%时BW最大、ADG最大、F/G最低，表明适宜亚油酸水平对雏鹅的生长发育有促进作用，并提高饲料利用率。

3.2　饲粮中亚油酸水平对雏鹅脂类代谢的影响

研究表明，PUFA具有预防心血管疾病、治疗高血脂症、降低胆固醇血症风险等作用[12-13]。Stone等[14]研究证实，心血管病症发生的几率与体内摄入的饱和脂肪酸有关，脂肪酸越多，血清TCH含量越高，发病的几率就越高。血脂是指血液中所含有的脂类，包括TCH、TG、磷脂和游离脂肪酸，血清中TCH和TG含量过高，会使血液黏稠，引起高血脂症。脂蛋白是脂类物质的运输形式。组织中的胆固醇被高密度脂蛋白（HDL）运载至肝脏发生分解代谢，并能使之转化为胆汁酸或者直接通过胆汁排除肠道，使血清胆固醇含量得以降低。而低密度脂蛋白（LDL）是向外围组织转运肝脏合成的内源胆固醇[15]，导致动脉粥样硬化的产生原因是LDL过量，它所携带的胆固醇过多的留在动脉壁上[16]。冠心病的主要脂类危险因素是LDL-C含量高，调脂治疗最重要的目的是降低它的含量[17]，而HDL则起相反的抑制作用。肝脏中编码脂肪酸合成酶和糖酵解的基因转录被亚油酸抑制，导致脂类的合成被抑制，脂类的分解加强；亚油酸促进LDL的清除；肝脏中脂肪酸氧化得以促进，体脂沉积率被降低；增强HDL含量，HDL将细胞内的胆固醇转移到肝脏中降解[8,18-19]。

李荣刚[8]研究1~2月龄肉兔亚油酸需要量发现，亚油酸水平为0.9%和1.2%时血清TCH、LDL含量显著低于0和0.6%添加组。张艳荣等[20]研究表明，n-6 PUFA可以使高血脂鼠脂肪代谢得到很好良性循环，使体内的不良脂质沉积被抑制，降血脂作用高于市场上销售的降血脂产品。Pentieva等[5]研究表明，降低血脂、减少高脂对机体新陈代谢造成负担的最好帮手是PUFA，它能有效降低血清胆固醇及体内脂肪沉积。而王爽等[9]研究表明，蛋鸭产蛋初期饲粮中亚油酸水平分别为0.55%、0.75%、0.95%、1.15%、1.35%和1.55%，并没有影响到蛋鸭血浆和肝脏脂类数据。本研究表明，饲粮中亚油酸水平为1.12%时，能显著降低血清TCH、TG含量，并显著提高血清HDL-C含量，显著降低血清LDL-C含量，从而使机体心血管处于最佳生理状态，与上述研究结果基本一致。

3.3　饲粮中亚油酸水平对雏鹅抗氧化功能的影响

黄雪新等[21]研究表明，PUFA 能够提高抗氧化酶的活性，抵消 PUFA 过氧化的不良作用。亚油酸转化而成的γ-亚麻酸具有明显的抗脂质过氧化作用，是通过清除自由基来完成的[22]。MDA 是一种脂质过氧化物，间接反映氧化程度[23]。抗氧化酶是细胞抗氧化的主要体系，SOD、GSH-Px 是主要的抗氧化物。T-AOC 是衡量机体抗氧化系统功能状况的综合指标，机体抗氧化系统对外来刺激的代偿能力以及机体自由基代谢的状态通过其大小总体来反映[24]。Aviram[25]研究显示，脂肪增加了机体的代谢压力和负担，全血黏度增大受血脂升高的影响，脂质过多会沉积在血管内皮中，在内皮中产生的氧化酶减少，自由基消除的能力降低，大量的脂质过氧化产物 MDA 及自由基被生成。夏兆刚[26]研究显示，分别添加不同含量的玉米油、胡麻油和鱼油在蛋鸡饲粮，发现显著影响了肝脏过氧化分解产物 MDA 的含量，随着不饱和油脂添加量的增加，MDA 含量呈明显的上升趋势，鱼油添加组要显著高于玉米油组。本试验结果表明，当饲粮中亚油酸水平为 1.12%时，T-AOC 及 GSH-Px、T-SOD 的活性最强，并随着饲粮亚油酸水平的升高而升高，说明亚油酸水平能够显著影响鹅的脂质抗氧化能力；而血清和肝脏 MDA 含量受饲粮中亚油酸水平的影响较少。

3.4　饲粮中亚油酸水平对雏鹅免疫机能的影响

亚油酸影响动物免疫机能的机制：一是，细胞膜的结构骨架是磷脂双分子层，脂肪酸是磷脂的重要组分，因此，细胞膜的流动性取决于膜的脂肪酸组成[27]。饲粮中的脂肪酸组成会改变免疫细胞膜的脂肪酸组成并且能够调节膜的流动性，进而影响家禽免疫。二是，亚油酸是花生四烯酸（AA）的母体。AA能够刺激吞噬细胞和粒细胞进行呼吸爆发，一种原因是由于产生的生理活性物质类花稀酸调控免疫反应[28]；另一种原因是其本身或者含有的磷脂酸以及二酯酰甘油可作为第2信使直接调节机体免疫[29]。

免疫器官的发育状态可以反映免疫机能的高低，免疫器官相对重量是评定机体免疫状况的方法之一，相对重量低是免疫受到抑制，相对重量高免疫效果加强[30]。胸腺是中枢免疫器官，为T淋巴细胞发育的主要场所[31]。脾脏是外周免疫器官，是各类免疫细胞居住的场所，也是对抗原物质产生免疫效应的重要基地[32]。法氏囊是禽类特有的中枢免疫器官，它们同体液免疫密切相关[33]。大量研究结果表明，法氏囊、胸腺和骨髓中PUFA的组成受饲粮中脂肪酸组成的影响[34-36]。Wang等[36]研究发现，增加饲粮中PUFA的含量，明显加速了雏鸡前胸腺、脾脏和法氏囊的生长。本试验结果表明，饲粮中亚油酸水平为1.12%时能显著提高法氏囊指数，各组脾脏指数和胸腺指数也有随着饲粮中亚油酸水平提高先增加后降低趋势，这与上述研究结果基本一致。

免疫球蛋白通常也称为抗体，IgG、IgM、IgA 是介导体液免疫的主要效应分子，在机体防御系统中发挥着重要的作用，它们的水平是反映机体免疫状况的重要指标[37]。禽流感抗体效价是反映机体禽流感免疫状态的指标，其数值的高低直接反映了机体对禽流感的体液免疫状态，同时也表明动物体对疫病的抵抗力[38]。夏兆刚[26]研究发现，在产蛋鸡饲粮中分别添加 1%、3%、5%的鱼油，2%、4%、6%的胡麻油和 2%、4%、6%的玉米油，通过测定其对牛血清白蛋白(BSA)的抗体结果表明，与不添加脂肪的对照组相比，不饱和油脂均可以提高血清 BSA 抗体效价。本试验结果表明，饲粮中亚油酸水平为 1.12%时能显著提高血清 IgG 含量，各组血清 IgM、IgA 含量也有随着饲粮中亚油酸水平提高先增加后降低趋势，这与上述研究结果基本一致。

近几年来，我国每年从国外进口大量战备储备粮小麦作为饲料原料，由于小麦能量远低于玉米，亚油酸含量也低，作为主要原料配制家禽饲粮生产效果不够理想，尤其是在水禽饲料配制方面采用小麦代替玉米的研究报道较少。为此，确定小麦-豆粕型饲粮中亚油酸适宜水平，对指导水禽生产具有重要意义和市场应用前景。

4 结 论

① 试验组 BW、ADG、F/G 均优于对照组，饲粮中亚油酸水平为 1.12%时 BW 最大，F/G 最低。

② 饲粮中适宜亚油酸水平对保障雏鹅脂类正常代谢有显著作用。

③ 饲粮中亚油酸水平为 1.12%时，显著提高了雏鹅血清和肝脏的 T-AOC 及 T-SOD、GSH-Px 活性，提高了雏鹅的免疫器官指数和免疫球蛋白含量。

④ 饲粮中亚油酸水平为 0.92%时，提高了禽流感抗体滴度。

⑤ 建议雏鹅小麦-豆粕型饲粮中适宜亚油酸水平为 1.12%。

参考文献：

[1] 杜娟,赵磊,师光禄,等.亚油酸甲酯对朱砂叶螨的生物活性研究[J].中国农学通 2010,26(6):247–249.

[2] BALNAVE D.Essential fatty acids in poultry nutrition[J].Worle's Poultry Science Journal,1970,26(1):442–460.

[3] CUNNANE S C.Essential fatty-acid/mineral interactions with reference to the pig[J].Fats in Anima Nutrition,1984,2(2):167–183.

[4] MC DOWELL L R.Essential fatty acids vitamins in animal nutrition,comparative to human nutrition[M].San Diego:Academic Press,1989:400–421.

[5] PENTIEVA K,MCKILLOP D,DUFFY N,et al.Acute absorption of folic acid from a fortified

low-fat spread[J].European Journal of Clinical Nutrition,2003,57(10):1235–1241.

[6] 杨小军,贺喜,何力霞,等.日粮添加多不饱和脂肪酸对肉仔鸡抗氧化指标的影响[J].动物营养学报,2008,20(3):299–304.

[7] National Research Council.Nutrient requirements of poultry[S].9th ed.Washington,D.C.:National Academies Press,1994.

[8] 李荣刚.日粮亚油酸水平对生长肉兔生长性能、组织脂肪酸构成及脂质代谢的影响[D].硕士学位论文.泰安:山东农业大学,2011:8.

[9] 王爽,陈伟,阮栋,等.饲粮亚油酸水平对产蛋初期蛋鸭产蛋性能、蛋品质及脂类代谢的影响[J].动物营养学报,2015,27(3):731–739.

[10] FÉBEL H,MÉZES M,PÁLFY T,et al.Effect of dietary fatty acid pattern on growth,body fat composition and antioxidant parameters in broilers[J].Journal of Animal Physiology & Animal Nutrition,2010,92(3):369-376.

[11] 张哲,张青青,王杰,等.多不饱和脂肪酸对肉鸡生产性能的影响[J].山东畜牧兽医,2010,31(4):24–25.

[12] 李健斋,王抒,曾平.非高密度脂蛋白胆固醇用于评估及预测冠心病危险[J].中华心血管杂志,2004,32(11):963–966.

[13] HARMAN D.Free radicals in aging[J].Molecular and Cellular Biochemistry,1998,84(2):155–161.

[14] STONE N J,KUSHNER R.Effects of dietary modification and treatment of obesity:emphasis on improving vascular outcomes[J].Medical Clinics of North America,2000,84(1):95–122.

[15] 周顺伍.动物生物化学[M]3 版.北京:中国农业出版社,1999.

[16] 尹彩娜.不同油脂对小鼠氧化应激及血脂代谢的影响[D].硕士学位论文.无锡:江南大学,2008:15.

[17] 张娜娜,冯燕娴.非高密度脂蛋白胆固醇在冠心病风险评估中的价值[J].东南大学学报(医学版),2015(3):462-465.

[18] 张永刚,印遇龙,黄瑞林,等.多不饱和脂肪酸的营养作用及其基因表达调控[J].食品科学,2006,27(1):273–277.

[19] CLARK S D.Polyunsaturated fatty acid regulation of gene transcription:a mechanism to improve energy balance and insulin resistance[J].British Journal of Nutrition,2000,83 Suppl 1:S59–S66.

[20] 张艳荣,单玉玲,李玉.姬松茸ω-6 多不饱和脂肪酸对高血脂鼠的降血脂作用[J].吉林大学学报（医学版）,2006,32(6):960–963.

[21] 黄雪新,王远孝,艾丽霞,等.日粮不同动植物油配比对黄羽肉鸡血清学指标和抗氧化特性的影响[J].畜牧与兽医,2010,42(9):8–12.

[22] 方允中,郑容梁.自由基生物学的理论与应用[M].北京:科学出版社,2002.

[23] 李凤艳.复方中药多糖对雏鸡免疫及抗氧化功能的影响[D].硕士学位论文.哈尔滨:东北农业大学,2008.

[24] 郑荣梁,黄中洋.自由基生物学[M].3 版.北京:高等教育出版社,2007.

[25] AVIRAM M.Review of human studies on oxidative damage and antioxidant protection related to cardiovascular diseases[J].Free Radical Research,2000,33 Suppl:S85–S91.

[26] 夏兆刚.多不饱和脂肪酸对产蛋鸡免疫功能和抗氧化能力的影响及其机理的研究[J].博士学位论文.北京：中国农业大学 2003.

[27] GJØEN T,OBACH A,RØSJØ C,et al.Effect of dietary lipids on macrophage function,stress susceptibility and disease esistance in Atlantic salmon (*Salmo salar*)[J].Fish Physiology and Biochemistry,2004,30(2):149–161.

[28] LEIFERT W R,MCMURCHIE E J,SAINT D A.Inhibition of cardiac sodium currents in adult rat myocytes by n-3 polyunsaturated fatty acids[J].Journal of Physiology,1999,520(3):671–679.

[29] ELY E W,SEEDS M C,CHILTON F H,et al.Neutrophil release of arachidonic acid,oxidants,and proteinases:causally related or independent[J].Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Lipids and Lipid Metabolism,1995,1258(2):135–144.

[30] GROSSMAN C J.Interactions between the gonadal steroids and the immune system[J].Science,1985,227(4684):257–261.

[31] 张玉生,柳巨雄,刘娜.动物生理学[M].长春:吉林人民出版社,2000:342.

[32] VAN ETTEN E,BRANISTEANU D D,VERSTUYF A,et al.Analogs of 1,25-dihydroxyvitamin D3 as dose-reducing agents for classical immunosuppressants[J].Transplantation,2000,69(9):1932–1942.

[33] 甘孟候.禽病诊断与防治[M].北京:中国农业大学出版社,2002:17–29.

[34] FRITSCHE K L,CASSITY N A,HUANG S C.Effect of dietary fat source on antibody production and lymphocyte proliferation in chickens[J].Poultry Science,1991,70(3):611–617.

[35] FRIEDMAN A,SKLAN D.Effect of dietary fatty acids on antibody production and fatty acid composition of lymphoid organs in broiler chicks[J].Poultry Science,1995,74(9):1463–1469.

[36] WANG Y W,FIELD C J,SIM J S.Dietary polyunsaturated fatty acids alter lymphocytesubset proportion and proliferation,serum immunoglobulin G concentration,and immune tissue development in chicks[J].Poultry Science,2000,79(12):1741–1748.

[37] 孙建宏,曹殿军,符芳,等.鸡免疫球蛋白检测技术的发展[J].黑龙江畜牧兽医,2000(12):35–36.

[38] 金兰梅,伍清林,刘萍.禽流感疫苗对禽类免疫效果的检测与分析[J].中国畜牧兽医,2005,32(1):46–48.

Effects of Linoleic Acid Level in Wheat and Soybean Meal Diet on Growth Performance, Lipid Metabolism, Antioxidant Capacity and Immune Function of Gosling [2]

GE Wenhua WANG Baowei* ZHANG Yangyang LONG Jianhua SHI Xueping ZHANG Ming·ai YUE Bin

(*Nutrition and Feed Laboratory of China Agriculture Research System, Institute of High Quality Waterfowl, Qingdao Agricultural University, Qingdao* 266109, *China*)

Abstract: This experiment was conducted to study the effects of linoleic acid level in wheat and soybean meal diet on growth performance, lipid metabolism, antioxidant capacity and immune function of gosling, and to further explore the appropriate linoleic acid level in wheat and soybean meal diet. A total of 360 one-day-old *Wulong* geese were randomly divided into 6 groups with 6 replicates per group and 10 geese (half male and half female) per replicate. Geese in group Ⅰ (control group) were fed a basal diet (linoleic acid level was 0.52%), and geese in experimental groups (groups Ⅱ to Ⅵ) were fed experimental diets (linoleic acid level were 0.72%, 0.92%, 1.12%, 1.32% and 1.52%, respectively). The experiment lasted for 4 weeks. The results showed as follows: 1) The body weight (BW), average daily gain (ADG) and feed to gain ratio (F/G) in experimental groups were all better than those in the control group. When the dietary linoleic acid level was 1.12%, the BW was the largest and the F/G was the lowest. 2) The serum total cholesterol (TCH) content in groups Ⅵ and Ⅴ was significantly lower than that in the control group (P<0.01), the serum triglyceride (TG) content in groups Ⅳ and Ⅴ was significantly lower than that in the control group (P<0.05), the serum high density lipoproteins-cholesterol (HDL-C) content in groups Ⅳ and Ⅴ was significantly higher than that in the control group (P<0.01), the serum low density lipoprotein-cholesterol （LDL-C） content in group Ⅳ was

*Corresponding author, professor, E-mail: wangbw@qau.edu.cn （责任编辑　武海龙）

significantly lower than that in the control group ($P<0.05$). 3) The total antioxidant capability (T-AOC) and activities of total superoxide dismutaseand (T-SOD) and glutathione peroxidase (GSH-Px) in serum and liver were significantly higher than those in the control group ($P<0.01$). 4) The Bursa of Fabricius index in group Ⅳ was significantly higher than that of the control group ($P<0.01$), the serum immunoglobulin G (IgG) content in group Ⅲ was significantly higher than that in the control group ($P<0.05$), the antibody titer of avian influenza in group Ⅲ was significantly higher than that of the control group after immunization 14 days. In conclusion, the appropriate linoleic acid level in wheat and soybean meal diet have significant effects on growth performance, lipid metabolism, antioxidant capacity and immune function of gosling; the optimal level of linoleic acid in wheat and soybean meal diet for gosling is 1.12%.

Key words: linoleic acid; gosling; growth performance; lipid metabolism; antioxidant capacity; immune function